

**Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik**

**Bachelor-Thesis**

**Messung von biachsialen Spannungs-Dehnungs-  
Kurven gemäß ISO 16842**

Von

Tobias Marx

Studiengang: Maschinenbau / Werkstofftechnik

Semester: 7

Erster Betreuer der HS Offenburg:

Zweiter Betreuer der HS Offenburg:

Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Nasdala

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seifert

Bearbeitungszeitraum: 03.04.2017 bis 03.07.2017

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich oder dem Gedanken nach aus Veröffentlichungen, unveröffentlichten Unterlagen und Gesprächen entnommen worden sind, als solche an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit durch Zitate kenntlich gemacht habe, wobei in den Zitaten jeweils der Umfang der entnommenen Originalzitate kenntlich gemacht wurde. Die Arbeit lag in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner Prüfungsbehörde vor und wurde bisher nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Versicherung rechtliche Folgen haben wird.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

---

## **Sperrvermerk**

Diese Bachelor-Thesis ist urheberrechtlich geschützt, unbeschadet dessen wird folgenden Rechtsübertragungen zugestimmt:

- der Übertragung des Rechts zur Vervielfältigung der Bachelor-Thesis für Lehrzwecke an der Hochschule Offenburg (§ 16 UrhG),
- der Übertragung des Vortrags-, Aufführungs- und Vorführungsrechts für Lehrzwecke durch Professoren der Hochschule Offenburg (§ 19 UrhG),
- der Übertragung des Rechts auf Wiedergabe durch Bild- oder Tonträger an die Hochschule Offenburg (§21 UrhG).

## Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Sperrvermerk.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen .....	3
2.1 Vorstellung ISO 16842 .....	3
2.1.1 Grenzformänderungsdiagramm nach ISO 16842 Anhang A .....	5
2.2 Alternative Versuche .....	6
2.2.1 Earing-Test nach EN 1669 .....	6
2.2.2 Tiefungsversuch von Erichsen nach DIN EN ISO 20482.....	6
2.2.3 Bulge-Versuche .....	7
2.3 Grenzformänderungsdiagramme .....	8
3 Versuche.....	10
3.1 Einachsiger Zugversuch mit Aluminiumproben nach DIN EN ISO 6892-1 .....	10
3.1.1 Spannungs-Dehnungs-Kurven.....	13
3.2 Biachsialer Zugversuch mit Aluminium nach ISO 16842.....	15
3.2.1 Spannungs-Dehnungs-Kurven.....	22
3.2.2 Grenzformänderungsdiagramm .....	26
4 Ausblick.....	28
4.1 Vergleich mit alternativen Versuchen .....	28
4.2 Sicherheitsaspekte .....	28
4.3 Mögliche Folgearbeiten .....	29

## Inhaltsverzeichnis

---

5	Fazit .....	30
6	Literaturverzeichnis .....	31
7	Anhang.....	32
	Anhang A - Python Zugversuch.....	32
	Anhang B – Gnuplot Zugversuch .....	33
	Anhang C – Python biachsialer Versuch .....	34
	Anhang D – Gnuplot biachsialer Versuch.....	35
	Anhang E – Python FLD.....	36
	Anhang F – Gnuplot FLD .....	37

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
$\sigma$	Spannung in MPa
$\varepsilon$	Dehnung in Prozent
FEM	Fenite Elemente Methode
$W_0$	plastische Arbeit pro Volumeneinheit in MPa
$\varepsilon_0^p$	plastische Dehnung
$F_x$	Kraft in x-Richtung in kN
$F_y$	Kraft in y-Richtung in kN
FLC	Forming Limit Curve (Grenzformänderungskurve)
FLD	Forming Limit Diagram (Grenzformänderungsdiagramm)
Al	Elementsymbol für Aluminium
Mg	Elementsymbol für Magnesium
$\dot{\sigma}$	Spannungsgeschwindigkeit in $\frac{MPa}{s}$
$A$	Querschnittfläche in mm <sup>2</sup>
$\dot{F}$	Kraftgeschwindigkeit in $\frac{kN}{s}$
$r_1$	Ratio1 (Kraftverhältnis in Kreis 1 und 3)
$r_2$	Ratio2 (Kraftverhältnis in Kreis 2 und 4)
FPI	Freely Programmable Interface

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grenzformänderungsdiagramm für Aluminium[1].....	2
Abbildung 2: Probengeometrie .....	4
Abbildung 3 : Diagramm zur Bestimmung von plastischer Arbeit [1].....	5
Abbildung 4: Tiefungsversuch von Erichsen [4].....	6
Abbildung 5: Bulge Versuch nach Nakajima [5].....	7
Abbildung 6: Formänderungsverläufe [5] .....	8
Abbildung 7: Biachsiale Zugprüfmaschine .....	10
Abbildung 8 Flachprobe des Formtyps H [7] .....	11
Abbildung 9: Probe vor Zugversuch .....	12
Abbildung 10: Probe nach Zugversuch .....	12
Abbildung 11: Spannungs-Dehnungs-Kurve in Walzrichtung .....	13
Abbildung 12: Spannungs-Dehnungs-Kurve gegen Walzrichtung.....	14
Abbildung 13: Probe vor Beginn.....	15
Abbildung 14: FPI-Skript für den biachsialen Zugversuch.....	19
Abbildung 15: Zerstörte biachsiale Probe.....	21
Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Kurve Referenzversuch Verhältnis 1:0 .....	22
Abbildung 17: Zweiachsiger Zugversuch Verhältnis 4:1 .....	23
Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Kurven mit Verhältnissen von 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2 und 1:4. ....	24
Abbildung 19: Einachsiger Zugversuch Verhältnis 0:1 .....	25
Abbildung 20: Grenzformänderungsdiagramm.....	27
Abbildung 21: Einspannung.....	28

---

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1: Abmessungen der Probe nach ISO 16842 .....</i>	<i>4</i>
<i>Tabelle 2: Abmessungen der Zugprobe .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 3: Kraft auf die Kreise .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 4: Werte für die Arbeit bei vorgegebener plastischer Dehnung .....</i>	<i>26</i>



## 1 Einleitung

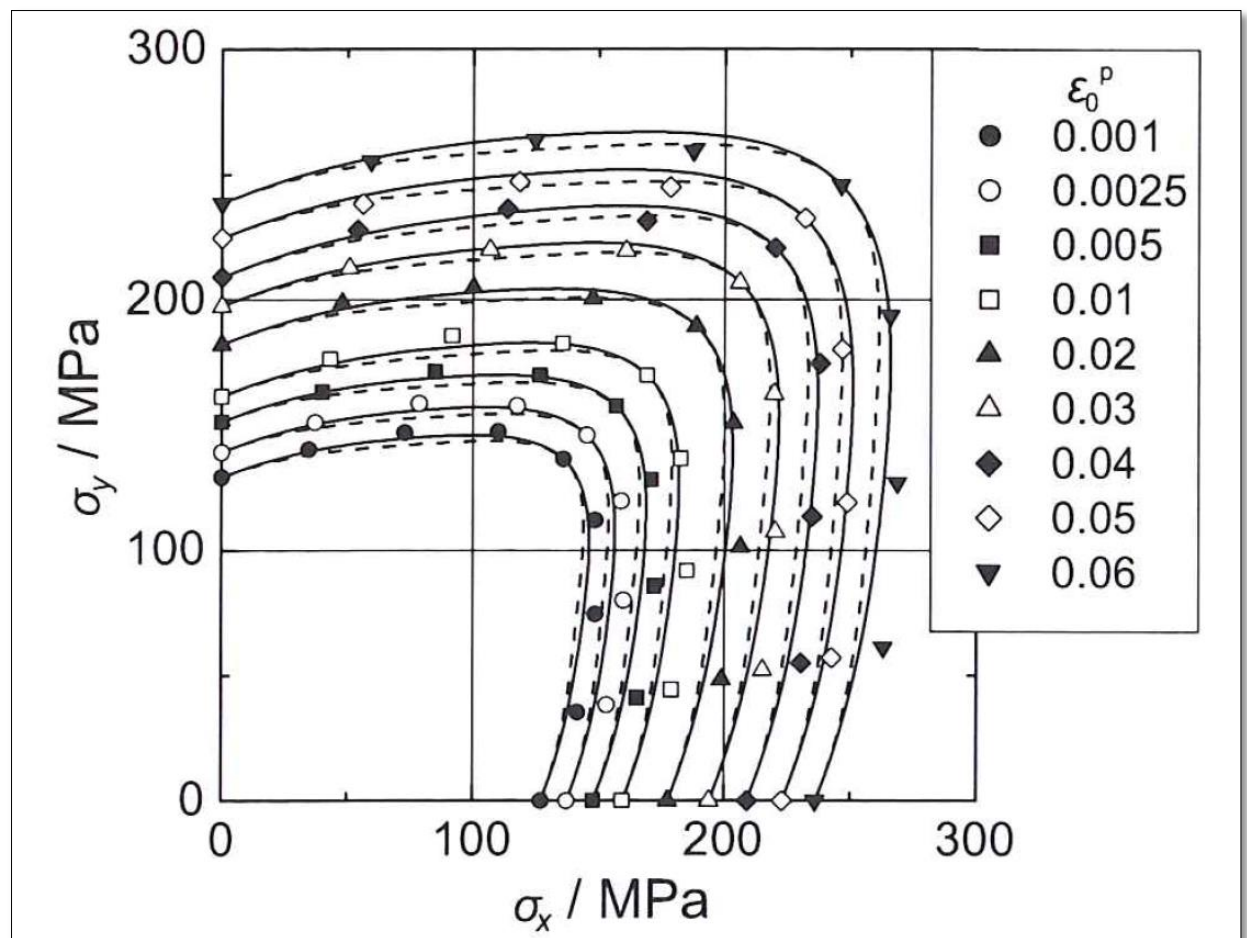
Grenzformänderungsdiagramme bieten die Möglichkeit, die Verfahrensgrenzen bei der Umformung von Blechwerkstoffen zu bestimmen und dienen der Beurteilung der Umformeigenschaften von Blechen. Oftmals finden Grenzformänderungsdiagramme in der Methodenplanung, im Werkzeugbau und zur Optimierung von Bauteil Geometrien Anwendung.

Ziel dieser Thesis ist die Erstellung eines Grenzformänderungsdiagramms für Aluminiumproben gemäß *ISO 16842 Anhang A*, mittels der Messung von Spannungs-Dehnungs-Kurven bei verschiedenen Kraftverhältnissen.

Als Motivation und Orientierung dient das Grenzformänderungsdiagramm in *Abbildung 1*. Zuerst wird ein einachsiger Zugversuch in Walzrichtung des Blechs durchgeführt und anschließend die einachsige wahre Spannung  $\sigma_0$  und die plastische Arbeit pro Volumeneinheit  $W_0$  für einen vorbestimmten Wert der einachsigen echten plastischen Dehnung  $\varepsilon_0^p$  bestimmt. Im Anschluss werden die zweiachsigen Zugversuche mit den Kraftverhältnissen  $F_x:F_y$ , sowie dem einachsigen Zugversuch gegen Walzrichtung durchgeführt. Es ist eine Gruppe von Punkten der Spannungen  $(\sigma_0, 0)$ ,  $(\sigma_x, \sigma_y)$  und  $(0, \sigma_{90})$ , für die die gleiche Menge an plastischer Arbeit erforderlich ist, auf den Hauptspannungsachsen aufgetragen, um eine Kurve der plastischen  $\varepsilon_0^p$  zu bilden.

[1]

Innerhalb dieser Arbeit wird zusätzlich der gesamte Ablauf des einachsigen und zweiachsigen Zugversuchs, sowie die Erstellung von Spannungs-Dehnungs-Kurven detailliert beschrieben.



**Abbildung 1: Grenzformänderungsdiagramm für Aluminium [1]**

## 2 Grundlagen

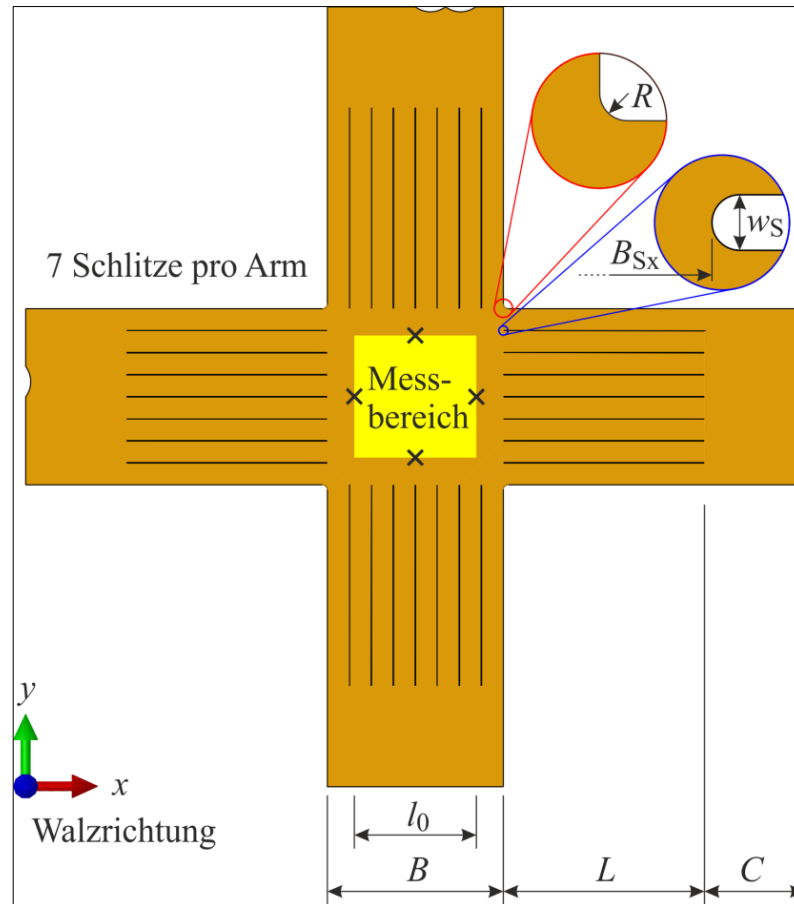
### 2.1 Vorstellung ISO 16842

Die Norm *ISO 16842:2014 Metallic materials – Sheet and strip – Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece*, welche am 01.10.2014 erschienen ist, dient zur Messung des elastoplastischen Werkstoffverhaltens. Zweck hierbei ist die Erstellung von Grenzformänderungsdiagrammen, bei beliebigen Spannungsverhältnissen von  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ , sowie Dehnungsverhältnissen von  $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ .

Der zweiachsige Zugversuch wird mit einer „*Biachsialen Elektromechanischen Prüfmaschine Serie LFM-BIAX 25kN*“ der Firma „*walter+bai*“ durchgeführt. Die Messung erfolgt durch eine Kamera, welche die aktuelle Dehnung anzeigt.

Der Versuch wird bei einer Temperatur zwischen 10 bis 30°C durchgeführt. Hierbei ist darauf zu achten, dass alle vier Arme der Probe perfekt eingespannt sind.

In *Abbildung 2* ist der Aufbau der biachsialen Zugprobe zu sehen, diese hat insgesamt sieben Schlitze pro Arm. Der Messbereich liegt in der Mitte und hat eine Länge von jeweils 25 mm pro Achse. Eine einzelne Einkerbung gibt an, dass die Probe in Walzrichtung liegt, jedoch zwei Einkerbungen, dass diese sich gegen die Walzrichtung befindet. [1]



**Abbildung 2: Probengeometrie**

**Tabelle 1: Abmessungen der Probe nach ISO 16842**

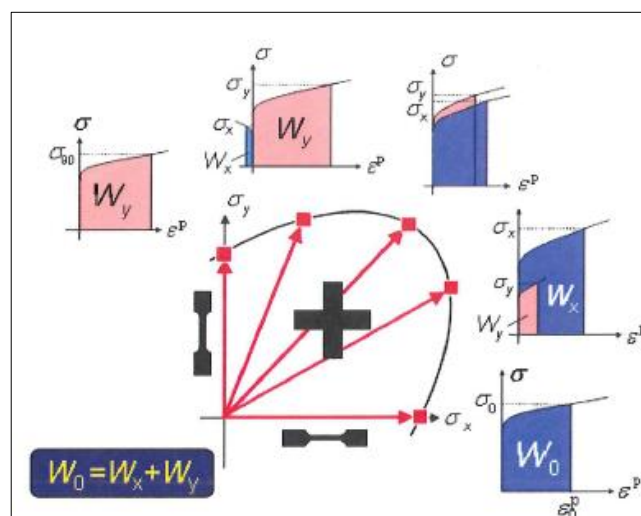
	min.	max.	gewählt
Blechdicke $a$	0,1 mm	0,08 B	0,5 mm
Armbreite $B$	30 mm		35 mm
Einspannlänge $C$	0,5 B	B	20 mm
Schlitzlänge $L$	B	2 B	40 mm
Eckradius $R$	0,0034 B	0,1 B	1 mm
Schlitzbreite $w_s$		0,3 mm	0,1 mm

Tabelle 1 zeigt die minimalen und maximalen, sowie die gewählten Abmessungen der Probengeometrie.

### 2.1.1 Grenzformänderungsdiagramm nach ISO 16842 Anhang A

Das Grenzformänderungsdiagramm kann nach *ISO 16842 Anhang A* erstellt werden. In diesem Anhang sind Methoden zur Messung von Ertragsflächen von Blechen angegeben. Diese Ertragsflächen sind nur dann wirksam, wenn die plastischen Verformungseigenschaften von Blechen ausgewertet werden sollen und für die Metalle eine optimale Ausgabefunktion zu erkennen ist. Die Bestimmung einer geeigneten Ausgabefunktion auf der Grundlage der zweiachsigen Zugversuche ist nützlich, um durch eine genaue Vorhersage die FEM (Fenite Elemente Methode) für Blechumformprozesse zu verbessern.

Abbildung 3 zeigt eine Methode zur Messung von plastischer Arbeit für Bleche. Zuerst wird ein einachsiger Zugversuch in Walzrichtung des Blechs durchgeführt, anschließend die einachsige wahre Spannung  $\sigma_0$  und die plastische Arbeit pro Volumeneinheit  $W_0$  für einen vorbestimmten Wert der einachsigen echten plastischen Dehnung  $\varepsilon_0^p$  bestimmt. Hierbei wird  $W_0$  als ein Bereich unterhalb der plastischen Dehnkurve festgelegt. Im Anschluss werden die zweiachsigen Zugversuche mit den Kraftverhältnissen  $F_x:F_y$  oder den Spannungsverhältnissen  $\sigma_x:\sigma_y$  sowie dem einachsigen Zugversuch gegen Walzrichtung durchgeführt. Es ist eine Gruppe von Punkten der Spannungen  $(\sigma_0, 0)$ ,  $(\sigma_x, \sigma_y)$  und  $(0, \sigma_{90})$ , für die die gleiche Menge an plastischer Arbeit erforderlich ist, auf den Hauptspannungsachsen aufgetragen, um eine Kurve der plastischen  $\varepsilon_0^p$  zu bilden. [1]



**Abbildung 3 : Diagramm zur Bestimmung von plastischer Arbeit [1]**

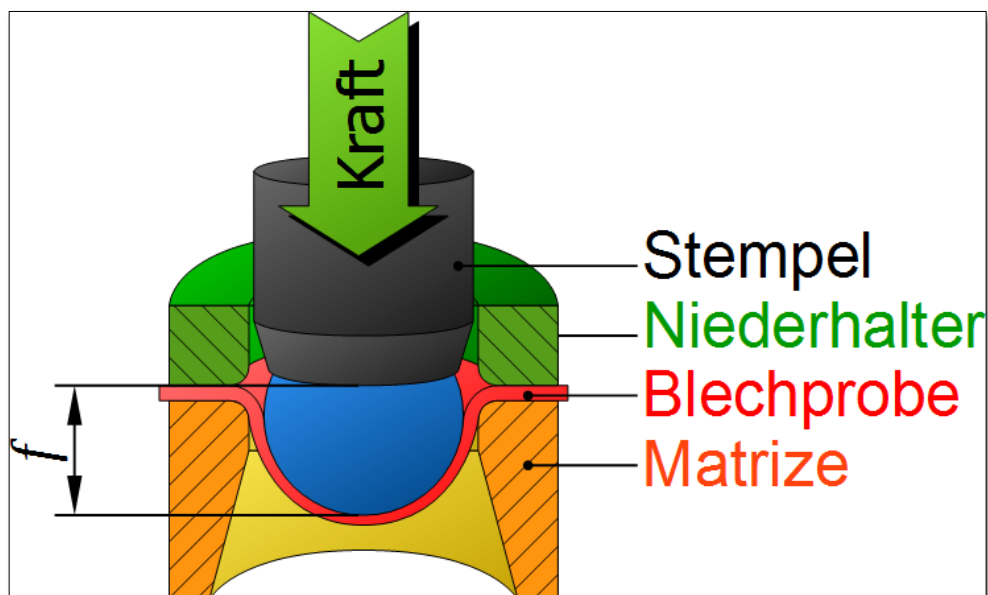
## 2.2 Alternative Versuche

### 2.2.1 Earing-Test nach EN 1669

Der Earing Test nach *EN1669* ist ein Verfahren zur Bestimmung der Zipfelbildung nach dem Näpfchenziehversuch. Dieser gilt für Bleche und Bänder einer Nenndicke von 0,08 bis 6mm. Zur Durchführung des Versuchs werden Roden als Proben eingesetzt und das Ziehverhältnis sollte so groß wie möglich gewählt werden, damit es nicht zu Rissen im Boden des Näpfchens kommt. Als Ergebnis wird die prozentuale Zipfelhöhe sowie die Lage und Ausrichtung der Hauptzipfel zur Walzrichtung bestimmt. [2]

### 2.2.2 Tiefungsversuch von Erichsen nach DIN EN ISO 20482

Der Tiefungsversuch von Erichsen nach *DIN EN ISO 20482* dient zur Bestimmung der Streckziehfähigkeit metallischer Bleche mit einer Dicke von 0,1 bis 2 mm und einer Breite von mindestens 90mm. In *Abbildung 4* ist der Versuchsaufbau dargestellt, hierbei wird ein Stempel mit einem Kugelkopf in einen Probenkörper eingedrückt, welcher zwischen einem Blechhalter und einer Matrize eingespannt ist. Dieser Vorgang wird so lange durchgeführt, bis ein durchgehender Riss innerhalb der Probenfläche sichtbar ist. Das Resultat des Versuchs ist die Tiefe der Tiefung bis zum Riss, was auch als Erichsen Tiefung IE bezeichnet wird. [3]



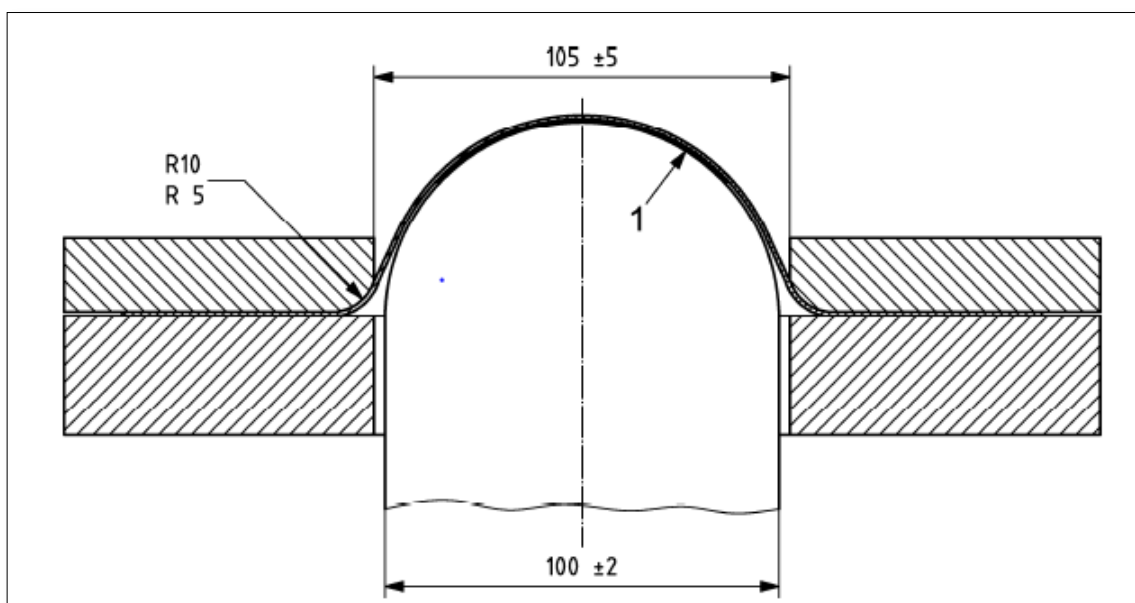
**Abbildung 4: Tiefungsversuch von Erichsen [4]**

### 2.2.3 Bulge-Versuche

Der Bulge Versuch kann nach zwei Vorgehensweisen durchgeführt werden, zum einen nach Nakajima und zum anderen nach Marciniak.

#### Nach Nakajima

Der Bulge Versuch nach Nakajima erfolgt durch einen halbkugelförmigen Stempel, welcher mit stetig steigendem Druck belastet wird. Anschließend kommt es zu einer Ausbeulung des Körpers. Der Versuch nach Nakajima verläuft bis zum Bruch der Probe. *Abbildung 5* zeigt den Querschnitt der Nakajima Prüfung. Durch den Verlauf der Blechdicke während der Durchführung kann eine Fließkurve ermittelt werden. [5]



**Abbildung 5: Bulge Versuch nach Nakajima [5]**

#### Nach Marciniak

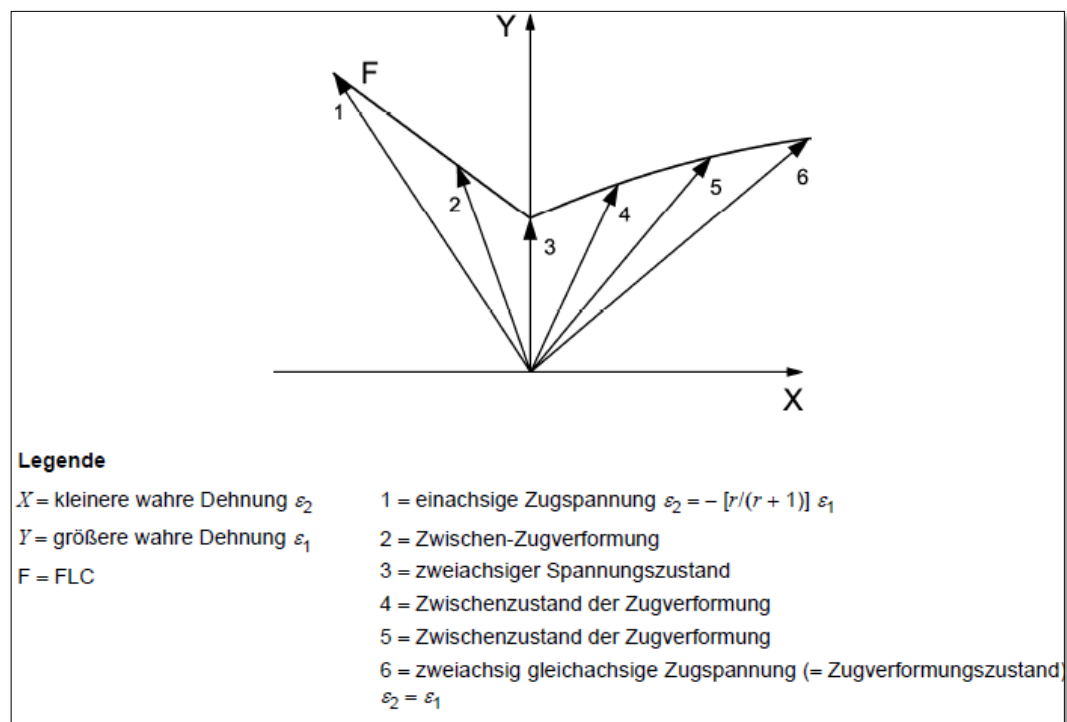
Der Bulge Versuch nach Marciniak, erfolgt im Gegensatz zum Nakajima Versuch mit einem ebenen Stempel. Um den Kontakt zwischen der Probe und der Stempelfläche zu verhindern sind Trägerschnitte erforderlich, damit der Bruch an der richtigen Stelle entsteht. [5]

## 2.3 Grenzformänderungsdiagramme

### Grenzformänderungsdiagramm (FLD)

Das Grenzformänderungsdiagramm wurde eingeführt, um die Menge an Verformung zu bestimmen, die ein Material vor dem Beginn der Einschnürung aushält. Es wird die gesamte Verformung über die Probe gemessen und anschließend durch Interpolieren die maximale Formänderung bestimmt, die der Werkstoff aushält ohne dabei Schaden zu nehmen. Dieses Maximum wird auch als Grenzformänderung bezeichnet.

Die Grenzformänderungen werden durch verschiedene Verhältnisse von  $\varepsilon_1$  zu  $\varepsilon_2$  für mehrere Formänderungsverläufe bestimmt. Diese Verläufe können von einachsiger bis zu zweiachsiger Zugspannung reichen. Die während des gesamten Versuchs aufgezeichneten Daten werden als Grenzformänderungskurve (FLC) aufgetragen. Die Kurve wird als Funktion der beiden wahren Dehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  auf der Blechoberfläche ausgedrückt und in dem Grenzformänderungsdiagramm eingetragen (siehe *Abbildung 6*). Die kleineren wahren Dehnungen  $\varepsilon_2$  werden auf der x-Achse abgetragen und die größeren wahren Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$  auf der y-Achse. [5]



**Abbildung 6: Formänderungsverläufe [5]**



**FLSD (forming limit stress diagram)**

Wenn dehnungsbasierte FLC's in spannungsbasierte FLC's umgewandelt werden, ist auffällig, dass die resultierenden spannungsbasierenden Kurven durch Änderung des Dehnungsweges minimal beeinflusst werden. Dies bedeutet, dass dehnungsbasierte FLC's, welche unterschiedlichen Dehnungswegen entsprechen, auf einer einzelnen spannungsbasierten FLC abgebildet werden können. Diese Eigenschaft macht die Grenzspannungsdiagramme (FLSD's) zu einer attraktiven Alternative zu herkömmlichen dehnungsbasierten FLD's. [6]

**Müschenborn-Sonne Grenzformänderungsdiagramm (MSFLD)**

Müschenborn und Sonne erstellten eine Methode, um den Einfluss des Verformungsweges auf die Formgrenzen von Blechen auf Basis der plastischen Dehnung vorherzusagen, mit der Annahme, dass die entstandene Grenzkurve die Summe der höchsten erreichbaren plastischen Dehnung darstellt.

Dies kann genutzt werden, um ein Kriterium der Einschnüristabilität von Blechen für beliebige Verformungswege zu schaffen. Dieser Ansatz erfordert die Umwandlung der ursprünglichen Grenzformänderungskurve (FLC) der großen und kleinen Dehnungen in eine Grenzformänderungskurve mit plastischen Dehnungen. [6]

### 3 Versuche

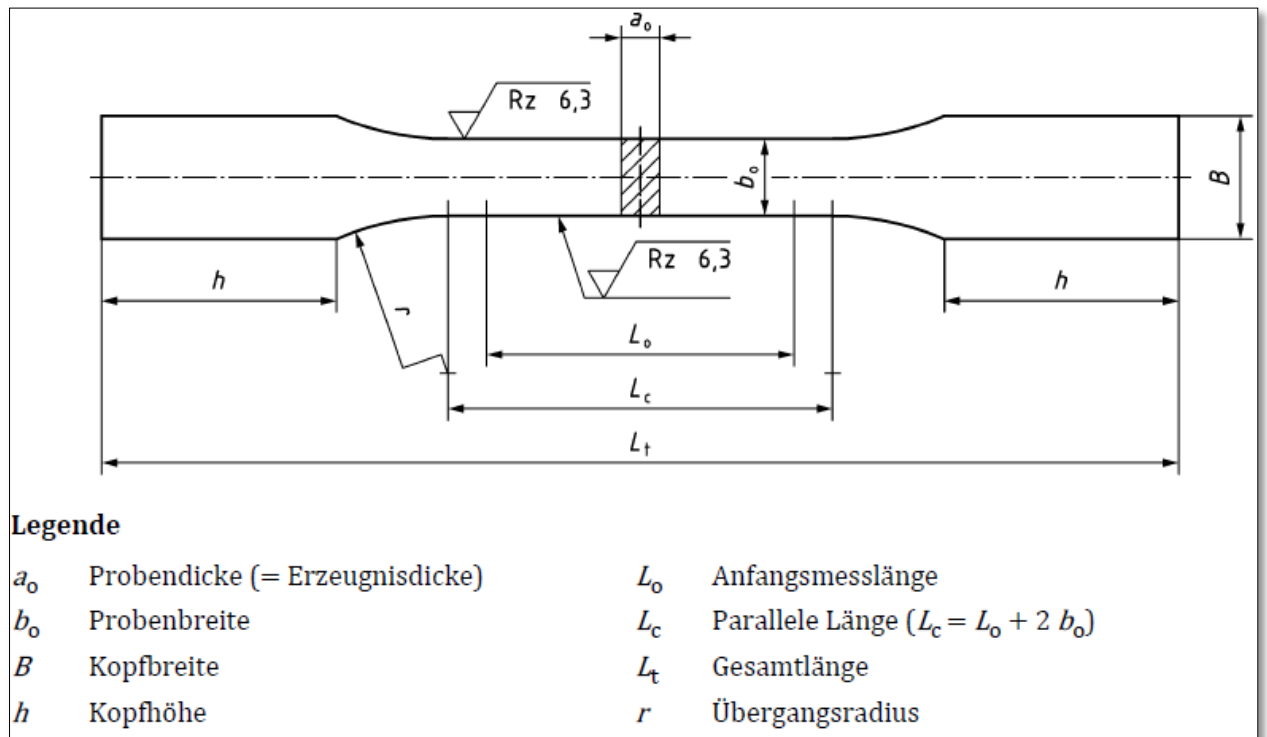
#### 3.1 Einachsiger Zugversuch mit Aluminiumproben nach DIN EN ISO 6892-1

Der Einachsige Zugversuch nach *DIN EN ISO 6892-1* wird mit einer Universalprüfmaschine der Firma „walter+bai ag“ durchgeführt (*Abbildung 7*) durchgeführt. Die maximal mögliche Prüfkraft dieser Maschine liegt bei 25kN. Über eine Kraftmessdose wird die aufgebrachte Prüfkraft gemessen. Die Längenänderung wird berührungslos durch eine Kamera angezeigt. Im Anschluss werden die hierbei gemessenen Werte an eine mit der Prüfmaschine verbundene Software übermittelt. Bei dieser Software handelt es sich um „*DION7*“ der Firma „walter+bai ag“.



**Abbildung 7: Biachsiale Zugprüfmaschine**

Die Probengeometrie ist nach *DIN 50125* festgelegt und für den Versuch wurde eine Aluminiumprobe vom Typ H gewählt. *Abbildung 8* stellt die Abmessungen der Probe dar, welche mittels Laserschneiden auf die vorgegebenen Maße exakt zugeschnitten wurde.



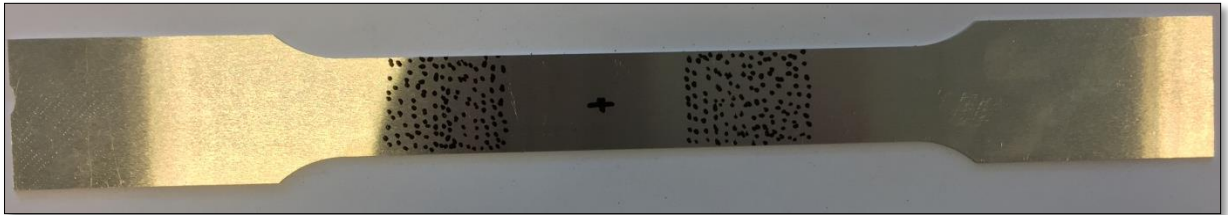
**Abbildung 8 Flachprobe des Formtyps H [7]**

**Tabelle 2: Abmessungen der Zugprobe**

$b_0$ in mm	$L_0$ in mm	$B$ in mm	$r$ in mm	$h$ in mm	$L_c$ in mm	$L_t$ in mm
20	80	30	20	50	120	150

In *Tabelle 2* sind die gewählten Maße der Zugprobe des Typ H abgebildet. Die Probendicke  $a_0$  soll laut Norm zwischen 0,1 und 3 mm liegen, für den Versuch wurde eine Dicke von 0,5 mm gewählt.

In *Abbildung 9* ist die Zugprobe vor dem Zugversuch zu sehen, hierfür wurden Punkte für eine bessere Messgenauigkeit der Kamera angebracht. Somit kann sichergestellt werden, dass es zu keinem Verlust der Probenmarkierung während des Zugversuchs kommen kann. Die Messung der Dehnung erfolgt mit einer Markierung in der Mitte der Probe bei einem Abstand von 80 mm.



***Abbildung 9: Probe vor Zugversuch***

*Abbildung 10* zeigt die Probe nach der Durchführung des Zugversuchs, auffällig hierbei ist die Lamellenstruktur, die durch die Belastung entsteht. Diese Struktur macht sich während des Versuchs durch ein leises Geräusch bemerkbar. Ursache hierfür ist die relativ kleine Dicke der Probe von 0,5 mm. Der Bruch der Probe erfolgt in einem 45° Winkel. Insgesamt wurden sechs Versuche durchgeführt, drei in Walzrichtung, sowie drei gegen Walzrichtung.



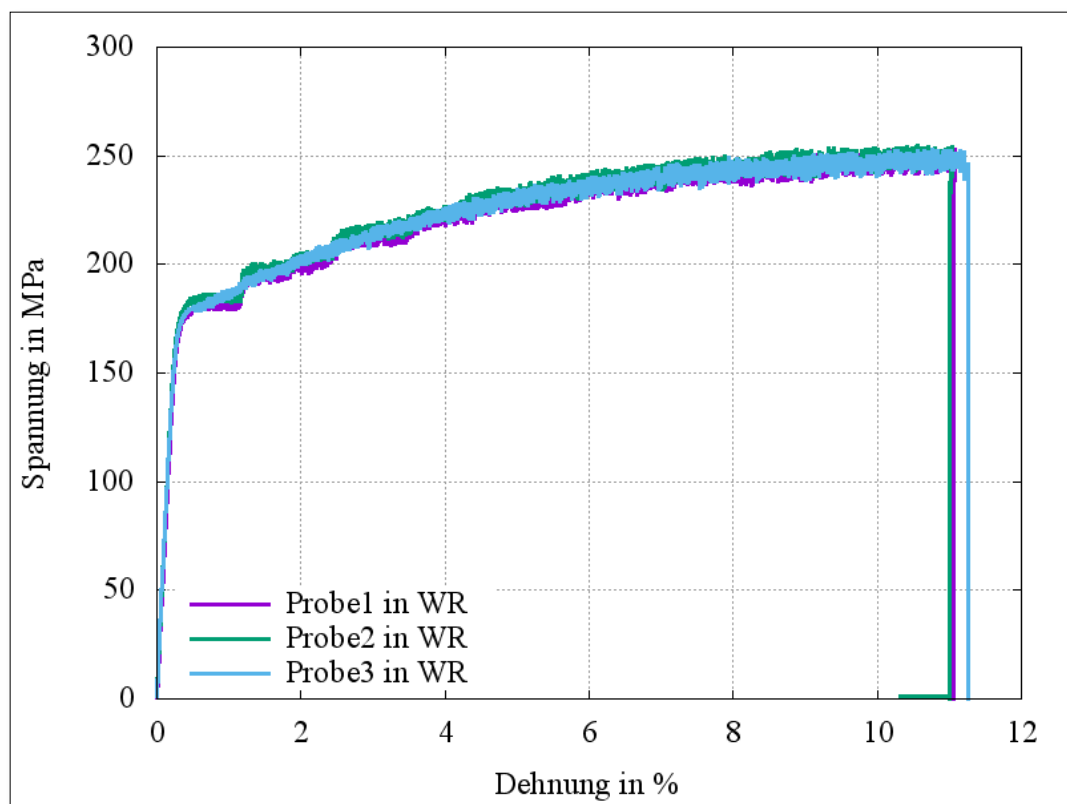
***Abbildung 10: Probe nach Zugversuch***

### 3.1.1 Spannungs-Dehnungs-Kurven

Im Anschluss an den Versuch wird eine Spannungs-Dehnungs-Kurve durch die gemessenen Werte aus den sechs Versuchen erstellt. Diese werden durch programmierte Skripte mit *Python* und *Gnuplot* generiert (siehe *Anhang A* und *Anhang B*). Hierbei wird die gemessene Dehnung übernommen. Die resultierende Spannung berechnet sich wie folgt:

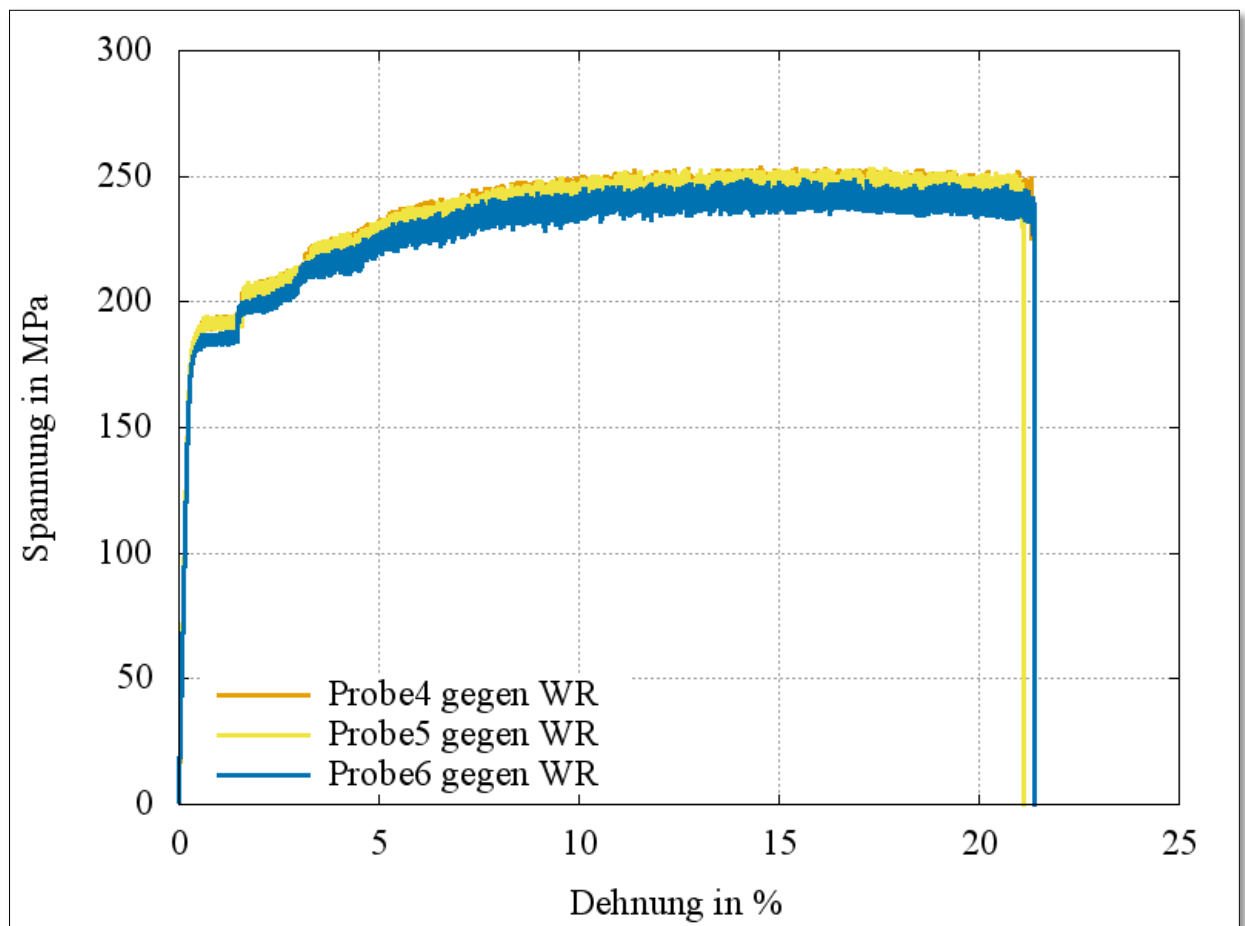
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Abbildung 11 weist die Spannungs-Dehnungs-Kurven von drei Aluminiumproben in ihrer Walzrichtung auf. Es handelt sich um eine AlMg3 Legierung mit einem E-Modul von etwa 70.000 MPa. Der Kurvenverlauf kann bei allen drei Versuchsdurchläufen als annähernd gleich angenommen werden. Die Streckgrenze liegt bei etwa 180 MPa bei einer Dehnung von 0,5 %. Die Einschnürung beginnt bei etwa 11 % Dehnung und einer Zugfestigkeit von 250 MPa. Kurz nach Einschnürungsbeginn kommt es bei einer Bruchdehnung von etwa 11,5 % zum Versagen der Probe.



**Abbildung 11: Spannungs-Dehnungs-Kurve in Walzrichtung**

In *Abbildung 12* sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von drei Aluminiumproben gegen ihrer Walzrichtung dargestellt. Die Streckgrenze liegt, wie in *Abbildung 11*, bei etwa 180 MPa mit einer Dehnung von 0,5 %. Der Einschnürungsbeginn befindet sich bei etwa 21 % Dehnung und einer Zugfestigkeit von 250 MPa. Die gesamte Dehnung bis zum Versagen der Probe hat einen Wert von 21,5 % Bruchdehnung.



**Abbildung 12: Spannungs-Dehnungs-Kurve gegen Walzrichtung**

Vergleicht man die beiden Spannungs-Dehnungs-Kurven miteinander, fällt auf, dass sowohl die Zugfestigkeit als auch die Streckgrenze nahezu identisch sind. Jedoch ist die Bruchdehnung der Proben gegen die Walzrichtung fast doppelt so groß. Grund dafür ist die Anisotropie von Aluminiumlegierung, bei denen die Dehnungskennwerte in Walzrichtung kleiner sind.

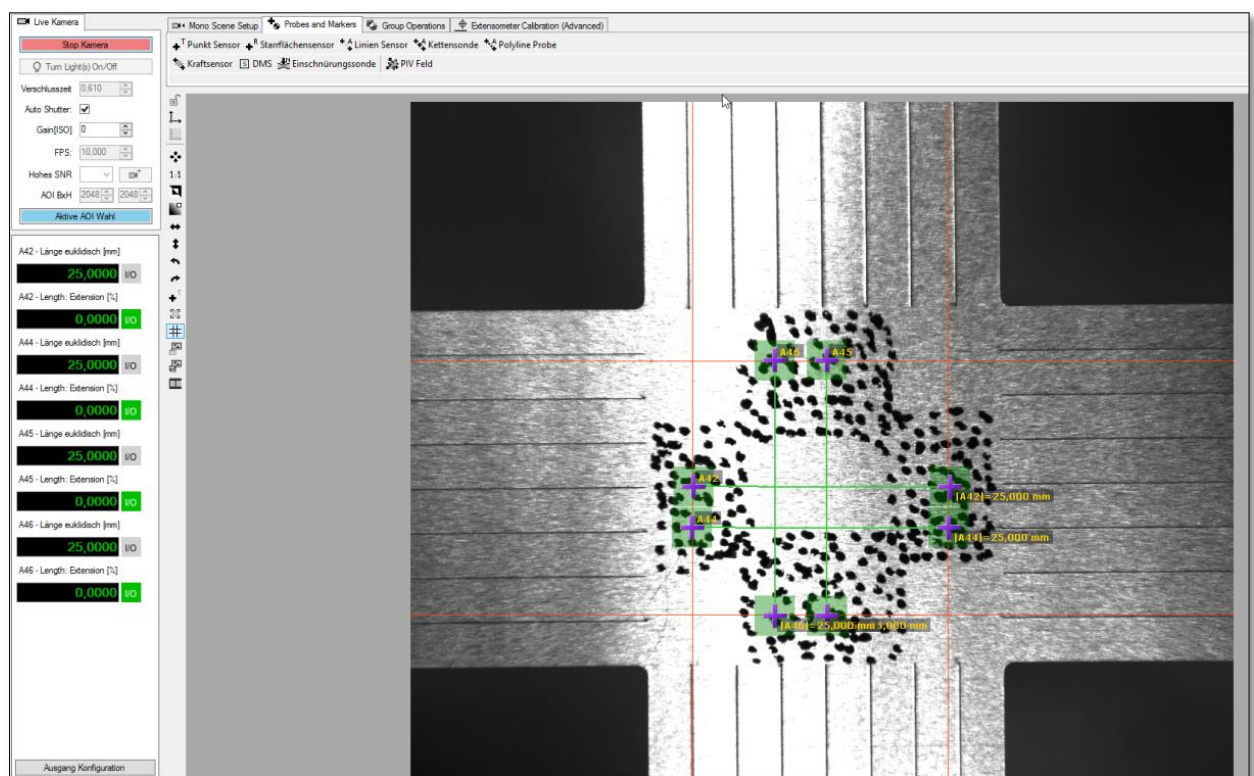


### 3.2 Biachsialer Zugversuch mit Aluminium nach ISO 16842

Der biachsiale Zugversuch nach *ISO 16842* mit einer biachsialen Aluminiumprobe erfolgt durch das Programm „*DION7*“ von „*walter+bai ag*“. Die Messung der Dehnung wird berührungslos über eine Kamera angezeigt.

*Abbildung 13* zeigt die Probe vor Beginn des Versuchs. Diese Grafik wird auf einem separaten Rechner, der mit der Maschine verbunden ist, angezeigt. Um Messungenauigkeiten zu vermeiden, ist es sinnvoll schwarze Punkte auf der Probe anzubringen, da es durch die Reflektion der Aluminiumprobe zu einem Verlust der Messpunkte kommen kann.

Der Abstand zwischen den beiden Messpunkten beträgt sowohl in x- als auch in y-Richtung 25 mm. Insgesamt werden jeweils zwei Dehnungen für jede Richtung ausgegeben, jedoch dient nur die in der Mitte liegende Linie als Referenz. Die gemessenen Dehnungen während des Versuchs werden an einen zweiten Rechner, welcher die Maschine steuert, weitergegeben.



**Abbildung 13: Probe vor Beginn**

Da ein zweiachsiger Zugversuch durch eine Kraftsteuerung geregelt wird, ist eine Berechnung der Traversengeschwindigkeit notwendig

Die Geschwindigkeit für eine Kraftregelung nach *DIN EN ISO 6892-1* berechnet sich wie folgt:

$$\dot{F}_{max} = \dot{\sigma}_{max} \times A \quad (2)$$

$$\dot{F}_{max} = 20 \frac{\text{MPa}}{\text{s}} \times 17,5 \text{ mm}^2 = 350 \frac{\text{N}}{\text{s}} = 0,35 \frac{\text{kN}}{\text{s}} \quad (3)$$

$$\dot{F}_{min} = \dot{\sigma}_{min} \times A \quad (4)$$

$$\dot{F}_{min} = 2 \frac{\text{MPa}}{\text{s}} \times 17,5 \text{ mm}^2 = 35 \frac{\text{N}}{\text{s}} = 0,035 \frac{\text{kN}}{\text{s}} \quad (5)$$

Die Spannungsgeschwindigkeit  $\dot{\sigma}$  für eine Kraftregelung ist nach *DIN EN ISO 6892-1 Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur* festgelegt und muss zwischen maximal  $20 \frac{\text{MPa}}{\text{s}}$  und  $2 \frac{\text{MPa}}{\text{s}}$  liegen. Die Kraftgeschwindigkeit  $\dot{F}$  berechnet sich aus dem Produkt der Spannungsgeschwindigkeit  $\dot{\sigma}$  und der Querschnittfläche  $A$ . Um sicher im vorgegebenen Bereich zu liegen, wird eine Kraftgeschwindigkeit  $\dot{F}_{\text{gewählt}}$  von  $0,05 \frac{\text{kN}}{\text{s}}$  gewählt.

Insgesamt werden sieben zweiachsige Zugversuche mit jeweils unterschiedlichen Kraftverhältnissen zwischen der x- und y-Achse durchgeführt. [8]



**Tabelle 3: Kraft auf die Kreise**

Kraftverhältnis	Kraft $F_1$ in Kreis 1 [kN]	Kraft $F_2$ in Kreis 2 [kN]
1:0	8,000	0,000
4:1	7,761	1,940
2:1	7,155	3,578
4:3	6,400	4,800
1:1	5,657	5,657
3:4	4,800	6,400
1:2	3,578	7,15
1:4	1,940	7,761
0:1	0,000	8,000

Tabelle 3 zeigt jeweils die Kraft  $F_1$  und die Kraft  $F_2$  für die einzelnen Kraftverhältnisse zwischen der x- und y-Achse. Bei einem Kraftverhältnis von „1:0“ handelt es sich um einen einachsigen Zugversuch in Walzrichtung, hingegen liegt bei einem Verhältnis von „0:1“ ein einachsiger Zugversuch gegen Walzrichtung vor.

Die Kräfte in den Kreisen eins und zwei lassen sich wie folgt berechnen:

$$F_1 = \frac{r_1}{\sqrt{r_1 + r_2}} F_{max} \quad (6)$$

$$F_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_1 + r_2}} F_{max} \quad (7)$$

Die maximale Kraft  $F_{max}$  wurde auf 8 kN festgelegt, um sicher oberhalb der maximal erträglichen Kraft der Zugprobe zu liegen. Die Variablen  $r_1$  und  $r_2$  (ratio1 und ratio2) stehen für die unterschiedlichen Kräfteverhältnisse. Die berechneten Kräfte dienen zur Kontrolle während des Versuchs, um sicherzustellen, ob die richtigen Kräfte auf die jeweiligen Zylinder anliegen.

Da der biachsiale Zugversuch durch eine Kraftsteuerung gesteuert wird, ist eine Programmierung durch den *FPI* (*freely programmable interface*) Modus des Softwareprogramms der Prüfmaschine erforderlich.

*Abbildung 14* zeigt einen Abschnitt des erstellten Programms im ersten Zylinder. Die vorher berechneten Werte für die maximale Kraft  $F_{max}$ , sowie die gewählte Kraftgeschwindigkeit  $\dot{F}_{gewählt}$ , werden in das erste Berechnungsfeld übertragen.

In das zweite Berechnungsfeld werden die Formeln aus *Gleichung 6* und *Gleichung 7* für die Kräfte  $F_1$  in den Kreisen 1 und 3 wie auch für die Kräfte  $F_2$  in den Kreisen 2 und 4 sowie für  $v_1$  und  $v_2$  eingetragen.

Im Anschluss folgt das Synchronisieren aller Zylinder sowie das Nullen der Kraft in Kreis 1.

Um im Nachhinein die richtige Anzeige für den Weg zu erhalten, müssen alle Schleppzeiger der einzelnen Kreise gelöscht werden.

Als Abbruchkriterium wird ein dynamischer Kraftabfall von 0,1 kN innerhalb aller Kreise gewählt. Dies ist notwendig um ein mögliches Verschieben der Zylinder zu verhindern.

Dieses Kriterium muss mit allen vier Kreisen synchronisiert werden.

An das Ende der Kette wird eine Krafterampe geschaltet, in welche die berechnete Geschwindigkeit  $v_1$  und die Endlage mit  $F_1$  übertragen wird. Als zusätzliches Sicherheitskriterium wird ein maximaler Weg von 50 mm gewählt.

Für die anderen Kreise werden die gleichen Angaben ab Punkt 4 übernommen.

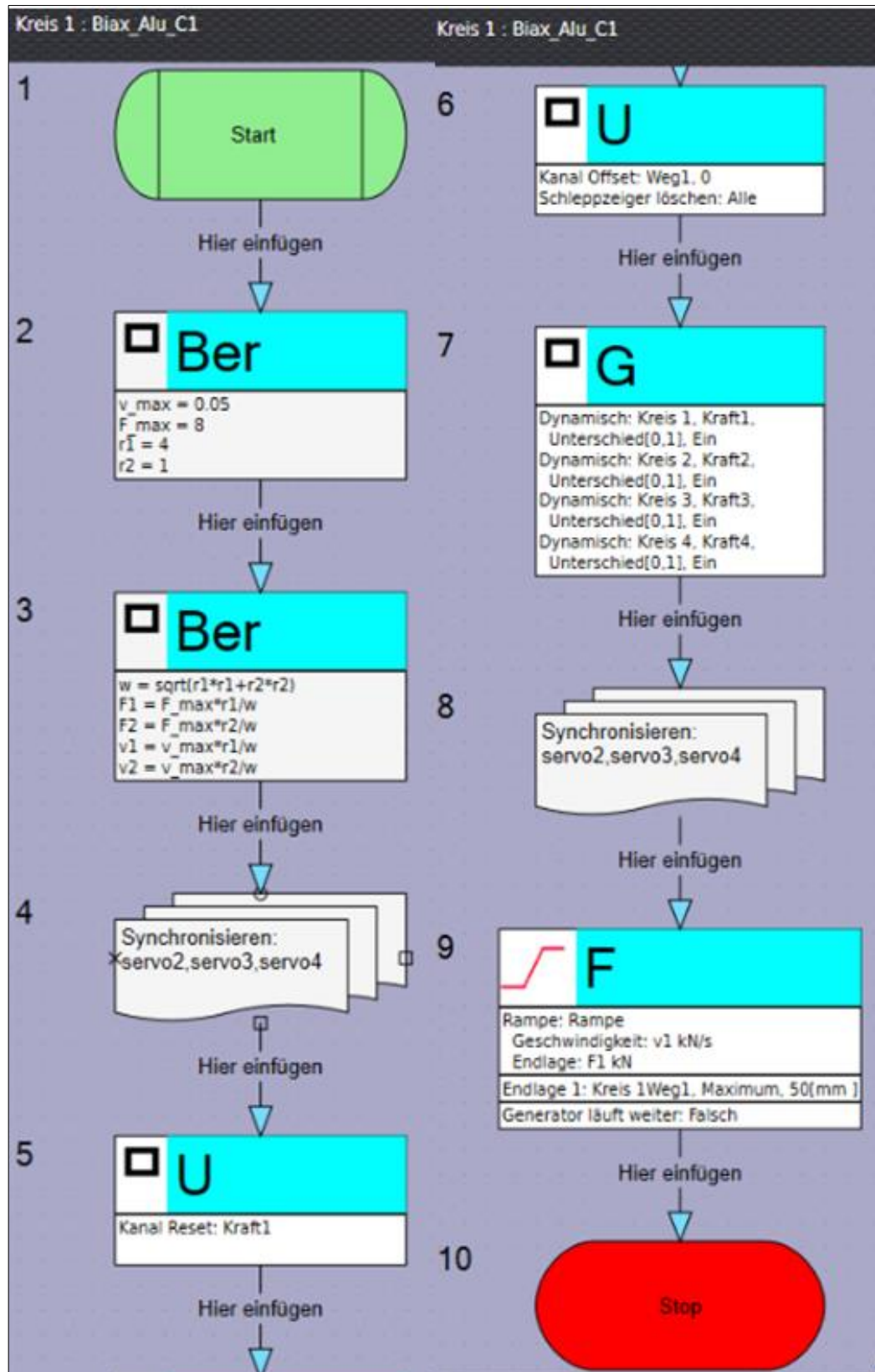
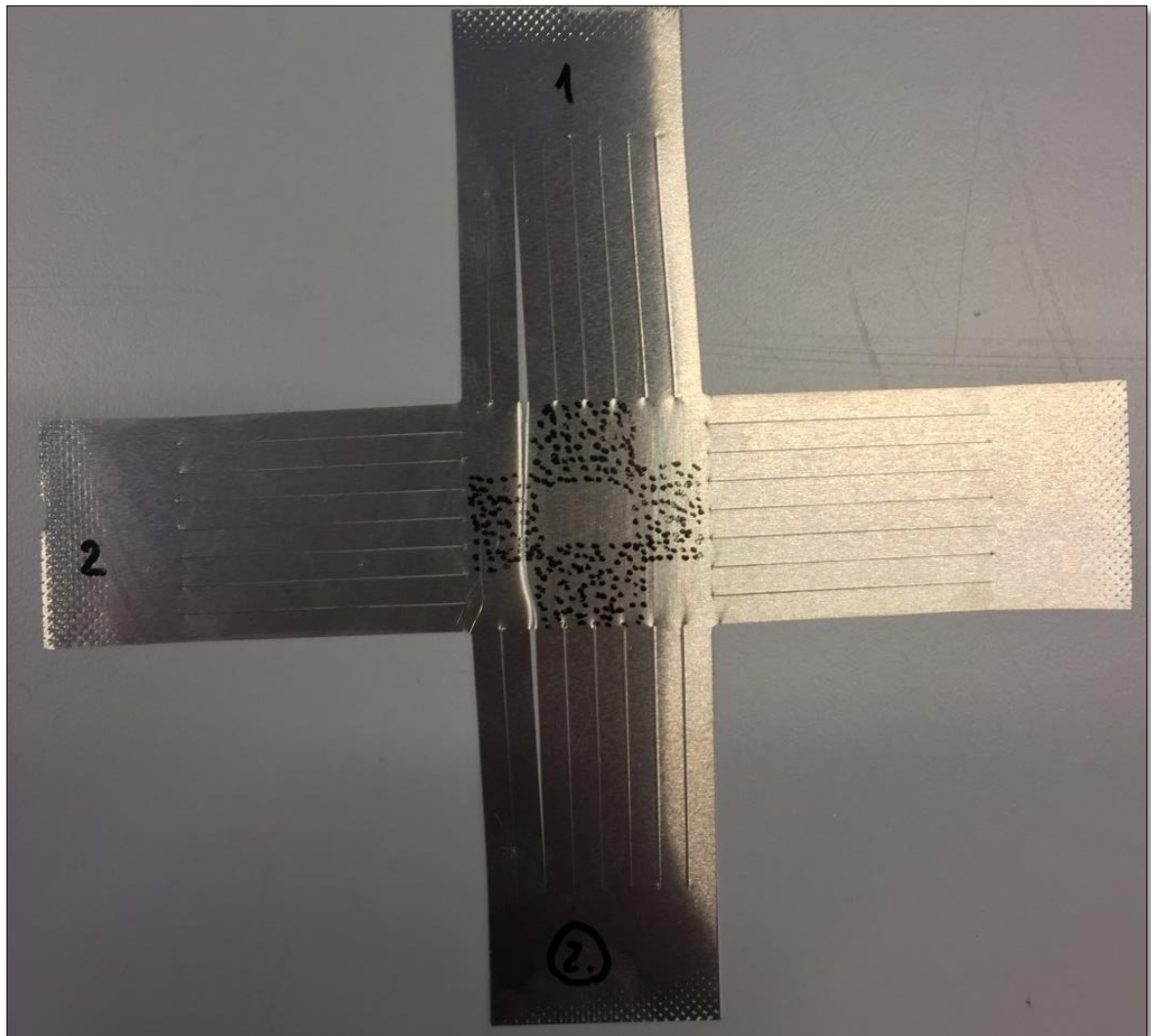


Abbildung 14: FPI-Skript für den biaxialen Zugversuch

Um während der Durchführung der sieben zweiachsigen Zugversuche keine Fehler zu begehen, wurde eine Checkliste wie folgt erstellt:

1. Genormte Kreuzprobe in allen 4 Spannbacken einspannen
2. Prüfen der Einspannungen
3. Markierungen für Kamera auf die richtige Position setzen
4. Screenshot vor dem Start des Versuchs
5. FPI ratio anpassen
6. Kräfte für alle Kreise auf 0,00 kN setzen
7. DION Diagrammdefinitionen anpassen
8. Dateiname ändern
9. Kamera starten
10. DION Versuch starten
11. Screenshot von dem Ende des Versuchs
12. Video exportieren
13. Daten konvertieren
14. Probe ausspannen
15. Kreise wieder auf ursprüngliche Position fahren

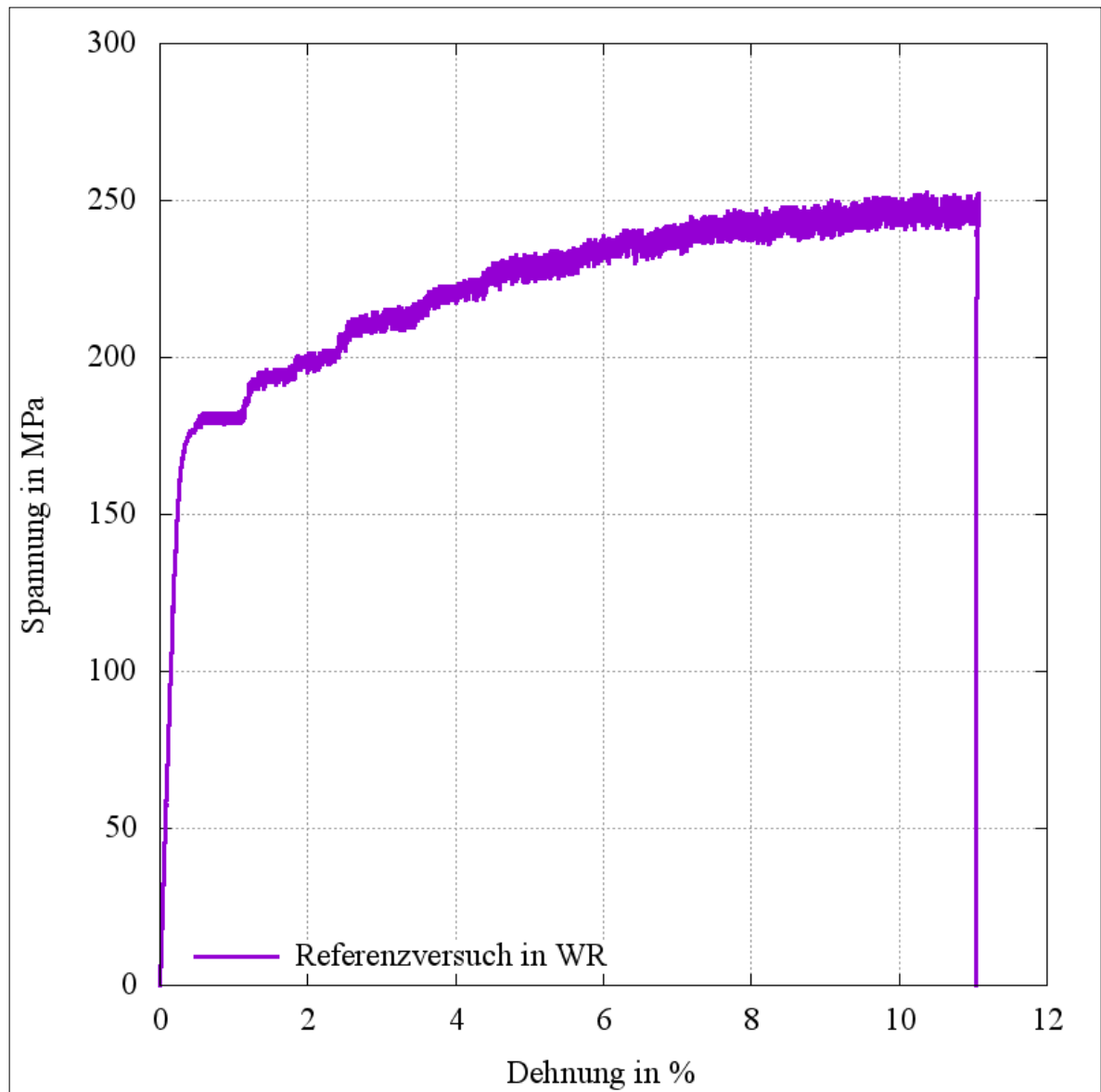
Abbildung 15 zeigt eine zerstörte biachsiale Probe nach dem Durchführen eines biachsialen Zugversuchs. Der Riss auf der Probe bildet sich innerhalb eines der Schlitze, da die Probe in diesem Bereich die höchste Instabilität hat.



**Abbildung 15: Zerstörte biachsiale Probe**

### 3.2.1 Spannungs-Dehnungs-Kurven

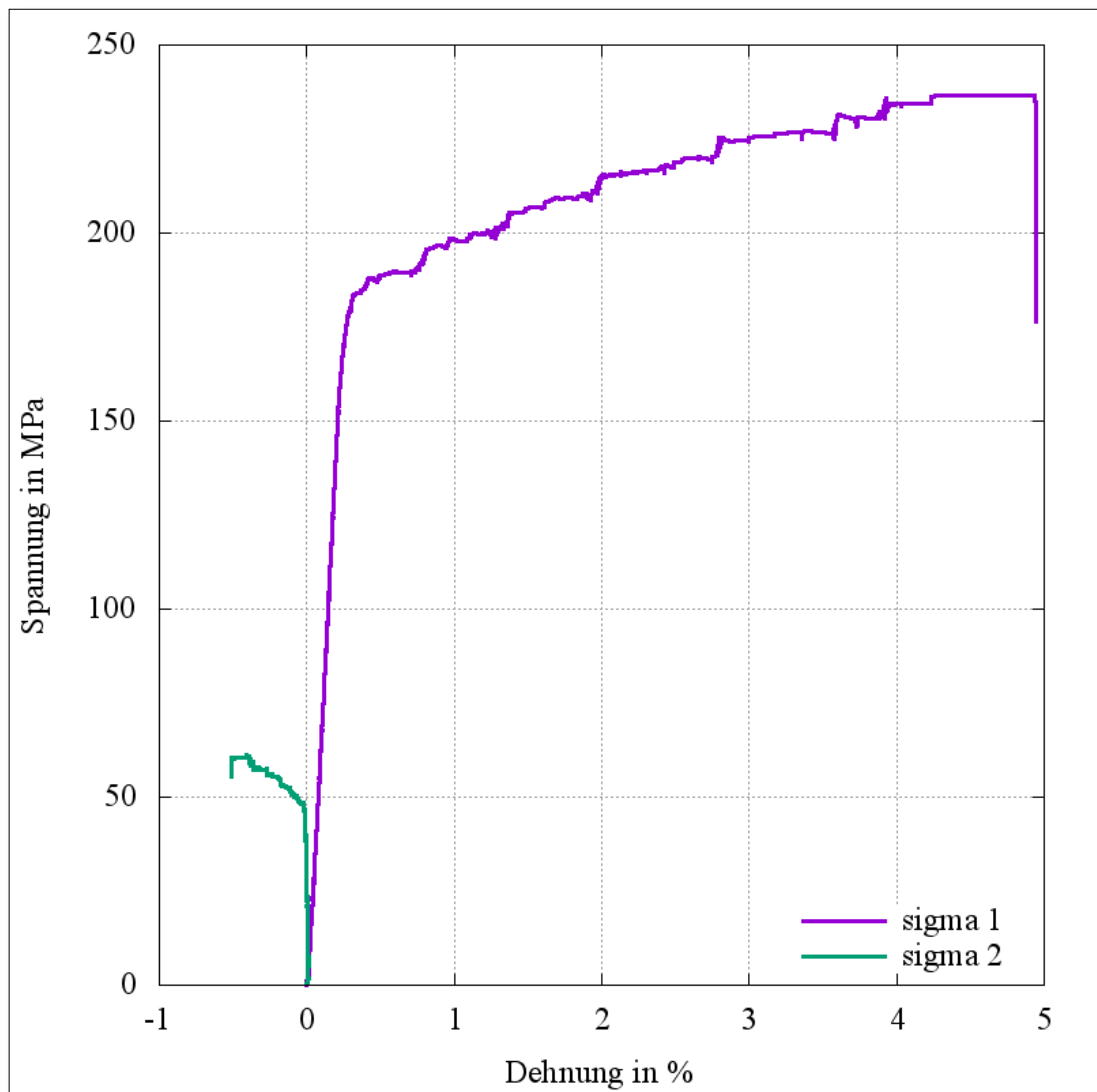
Abbildung 16 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve des einachsigen Zugversuchs bei einem Kraftverhältnis von 1:0. Dieser Versuch wurde mit der einachsigen Probengeometrie durchgeführt.



**Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Kurve Referenzversuch Verhältnis 1:0**

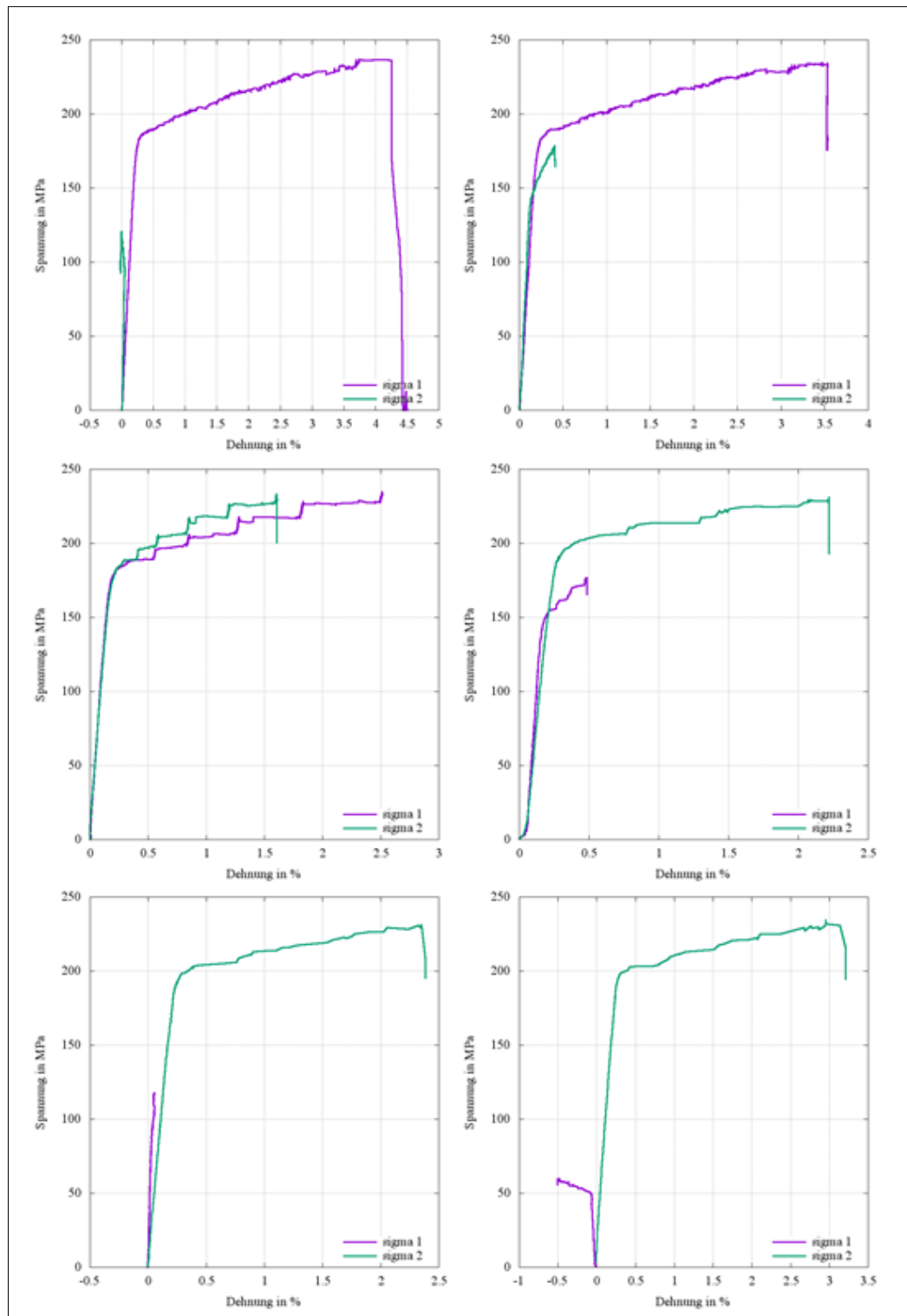
In *Abbildung 17* ist die Spannungs-Dehnungs-Kurven für ein Kraftverhältnis von 4:1 aufgezeichnet. Alle biachsialen Spannungs-Dehnungs-Kurven werden durch programmierte Skripte mit *Python* und *Gnuplot* generiert (siehe *Anhang C* und *Anhang D*).

Die maximal aufgebrachte Kraft in x-Richtung beträgt 7,761 kN und in y-Richtung 1,940 kN. Die maximale Spannung in x-Richtung  $\sigma_{x,max}$  liegt bei etwa 240 MPa und in y-Richtung  $\sigma_{y,max}$  bei 50 MPa. Die Bruchdehnung in x-Richtung hat einen Wert von etwa 5 %, jedoch in y-Richtung -0,5 %, was dadurch zu stande kommt, da sich durch die enorm größere Kraft in x-Richtung die Dehnung in y-Richtung staucht.



**Abbildung 17: Zweiachsiger Zugversuch Verhältnis 4:1**

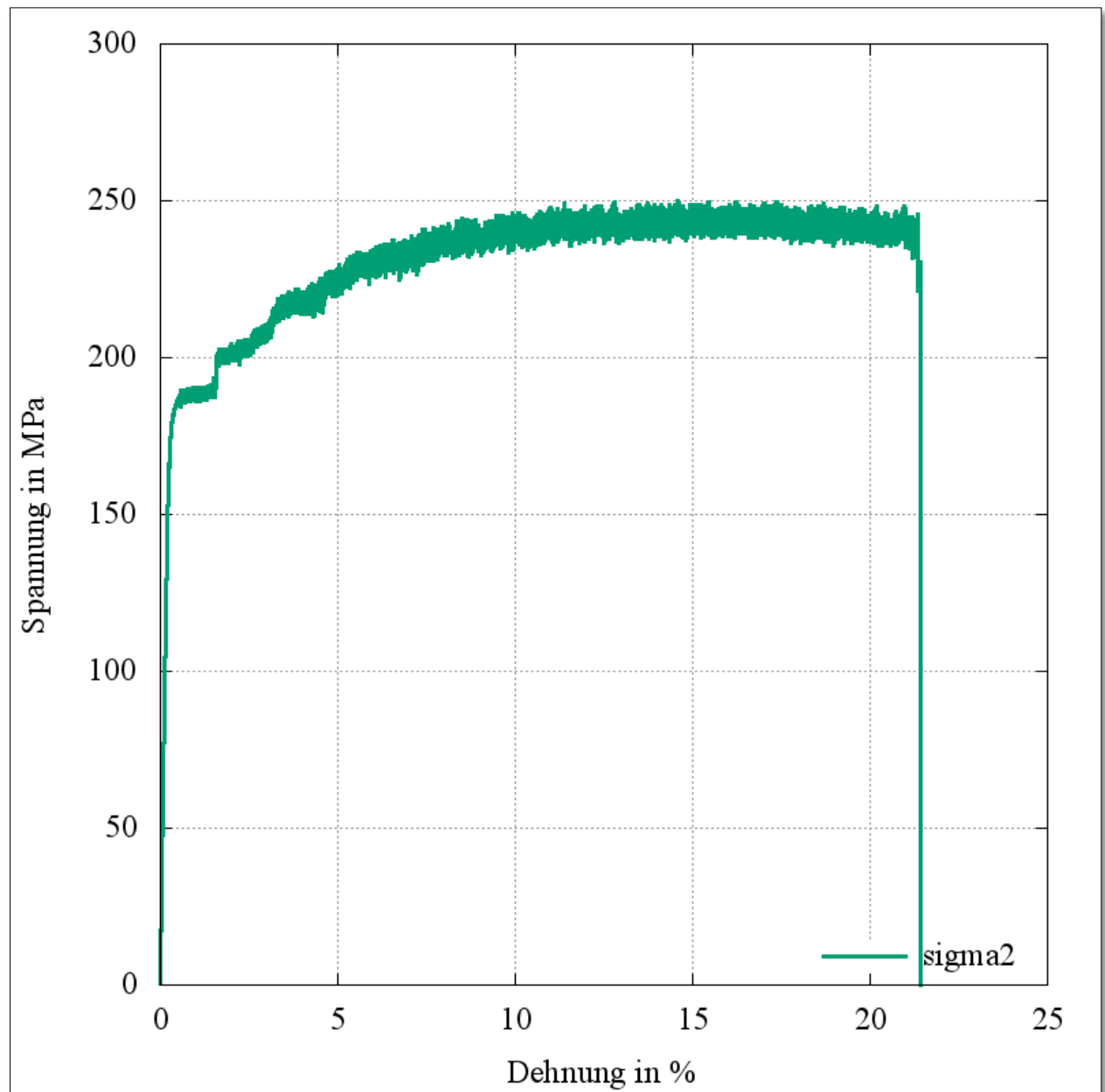
Die Spannungs-Dehnungs-Kurven in *Abbildung 18* haben Kraftverhältnisse von jeweils 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2 und 1:4.



**Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Kurven mit Verhältnissen von 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2 und 1:4.**



In *Abbildung 19* ist die Spannungs-Dehnungs-Kurve mit einem Kraftverhältnis von 0:1 aufgezeichnet. Hierbei handelt es sich um einen einachsigen Zugversuch gegen die Walzrichtung der Aluminiumprobe.



**Abbildung 19: Einachsiger Zugversuch Verhältnis 0:1**

### 3.2.2 Grenzformänderungsdiagramm

Um ein Grenzformänderungsdiagramm erstellen zu können muss zunächst die plastische Dehnung  $\varepsilon_0^p$  für den einachsigen Zugversuch in Walzrichtung wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_0^p = \varepsilon_x - \frac{\sigma_x}{E} \quad (8)$$

Zudem muss die gesamte Arbeit pro Volumeneinheit  $W_0$  in *Gleichung 9* ermittelt werden:

$$W_0 = \sum_{n=0}^n \frac{\sigma_{n+1} + \sigma_n}{2} (\varepsilon_{n+1}^p - \varepsilon_n^p) \quad (8)$$

**Tabelle 4: Werte für die Arbeit bei vorgegebener plastischer Dehnung**

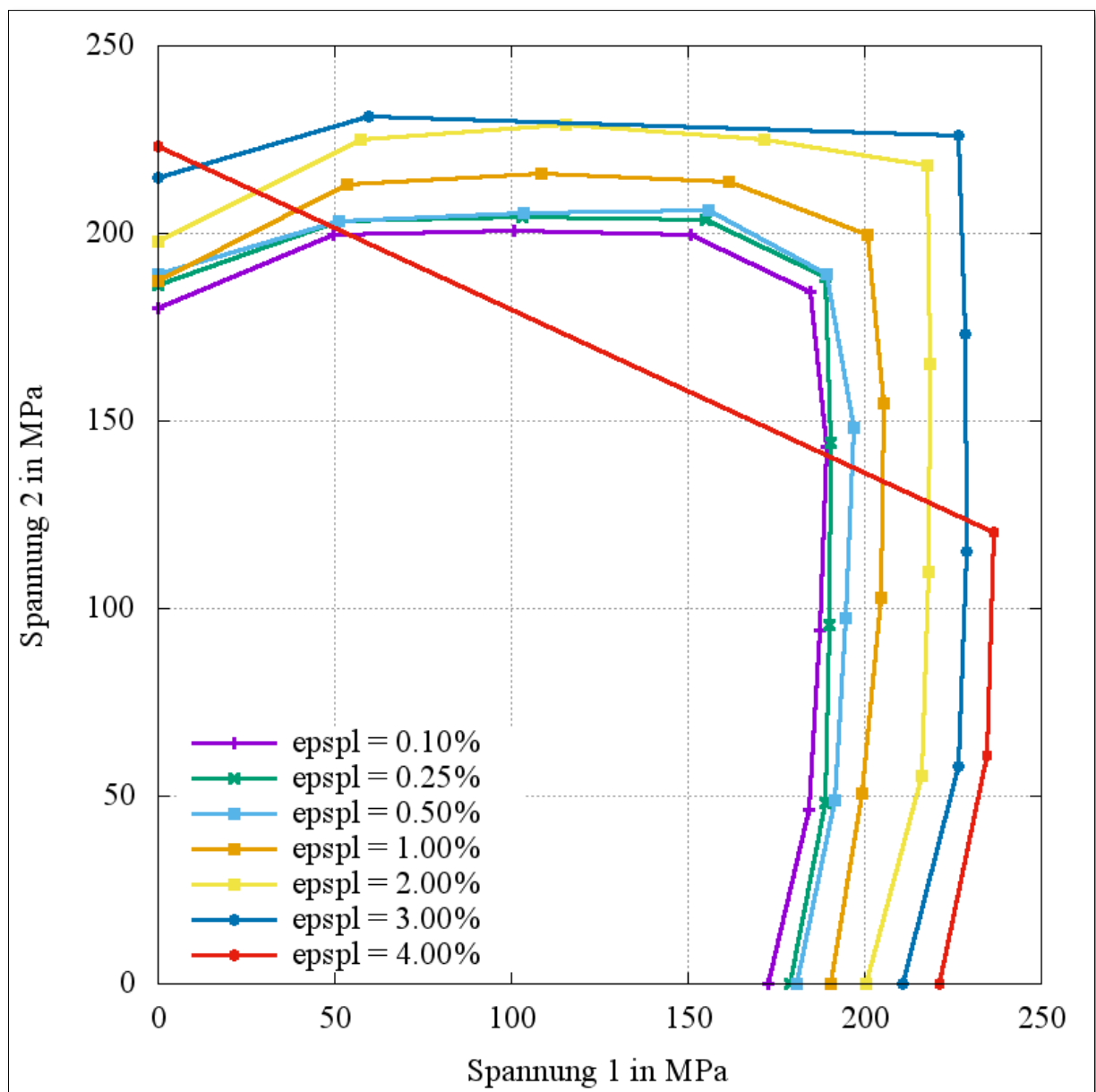
$\varepsilon_0^p$ in %	$W_0$ in MPa
0,1	0,156
0,25	0,420
0,5	0,870
1,0	1,783
2,0	3,741
3,0	5,830
4,0	8,012
5,0	10,282
6,0	12,605
8,0	17,384
10,0	22,260

Für die plastischen Dehnungen  $\varepsilon_0^p$  wird die Arbeit pro Volumeneinheit  $W_0$  durch Interpolation zugeordnet (*Tabelle 4*).

Danach werden der plastischen Arbeit  $W_0$  alle Spannungen aus den sieben biaxialen Zugversuchen, sowie dem einachsigen Zugversuch gegen die Walzrichtung, zugeordnet.

Das Grenzformänderungsdiagramm in *Abbildung 20* wird nach *ISO 16842 Anhang A* erstellt und ist in Abschnitt 2.1.1 beschrieben. Durch die programmierten Skripte mit *Python* und *Gnuplot* (siehe *Anhang E* und *Anhang F*) kann das FLD erstellt werden.

Die plastischen Dehnungen  $\varepsilon_0^p$  liegen zwischen 0,1 und 4 %. Den Versuchen mit den Verhältnissen von 4:3, 1:1, 3:4, 1:2 und 1:4 kann nur maximal eine plastische Dehnung  $\varepsilon_0^p$  von 3% zugeordnet werden, da durch verfrühtes Abreißen der Arme nicht die Festigkeit erreicht werden konnte.



**Abbildung 20: Grenzformänderungsdiagramm für Aluminium**

## 4 Ausblick

### 4.1 Vergleich mit alternativen Versuchen

Vergleicht man den biachsialen Zugversuch mit den in Abschnitt 2.2 beschriebenen alternativen Versuchen nach Nakajima und Marciniak, fällt auf, dass diese hauptsächlich für Grenzformänderungskurven nach der Dehnung genutzt werden.

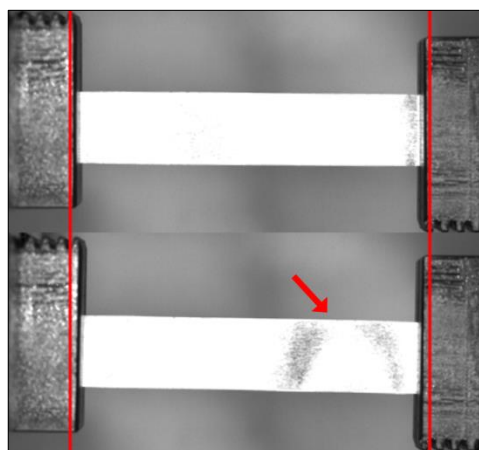
Durch den zweiachsigen Zugversuch können hingegen Grenzformänderungsdiagramme für Spannungsverhältnisse sowie Dehnungsverhältnisse erstellt werden. Außerdem kann eine genaue Aussage über den Spannungsverlauf einer Probe gemacht werden.

Ein Nachteil des Versuchs ist das Abreißen der Arme vor Erreichen der Festigkeit, wodurch das Grenzformänderungsdiagramm nicht komplett erstellt werden kann.

Zudem kommen zur Probenherstellung relativ hohe Kosten auf, da die Probe durch Laserschneiden hergestellt werden muss.

### 4.2 Sicherheitsaspekte

Ein wichtiger Sicherheitsaspekt beim Durchführen eines Zugversuchs ist das Einspannen der Probe. Hierbei ist darauf zu achten, die Probe nicht zu fest einzuspannen, da es dadurch zu einer erhöhten Spannung im Bauteil kommen kann, wodurch das gewünschte Ergebnis verfälscht werden könnte (*Abbildung 21*).



**Abbildung 21: Einspannung**

Zudem sollten alle Arme der Probe gleichmäßig eingespannt werden, um ein mögliches Verschieben zu verhindern. Des Weiteren sollten Abbruchkriterien für den Versuch angebracht werden, damit es zu keiner Beschädigung der Maschine kommt.

Insgesamt sollten alle Parameter der Zugversuche auf die vorliegende Probengeometrie angepasst und durch diverse Vorversuche getestet werden.

### **4.3 Mögliche Folgearbeiten**

Eine mögliche Folgearbeit wäre die Optimierung der biachsialen Zugprobe, um eine verbesserte Festigkeit der Probe zu erzeugen. Durch mögliches Anpassen der Probendicke sowie Schlitzbreite können hier Verbesserungen erzeugt werden.

Eine weitere Arbeit kann die metallographische Untersuchung der biachsialen Zugproben sein. Dadurch kann eine genaue Aussage über den Gefügebau der Proben gemacht werden.

## 5 Fazit

Der biachsialer Zugversuch nach ISO 16842 ist nur bedingt ein guter Versuch zur Erstellung von Grenzformänderungsdiagrammen, da durch das zu frühe Versagen nicht die maximale Festigkeit des Materials erreicht wird. Jedoch kann auch eine Aussage über die Spannungs-Dehnungs-Kurve des Materials gemacht werden.

Vergleicht man den biachsialen Zugversuch mit alternativen Versuch fällt auf, dass durch die aufwändige Probenherstellung, die Herstellungskosten hoch sind. Zudem nimmt die Einarbeitung und das Kennenlernen der Zugprüfmaschine relativ viel Zeit in Anspruch.

Diese Thesis dient als Vorstudie für weitere biachsiale Versuche, bei denen durch eine Veränderung der Probengeometrie eine höhere Festigkeit erreicht werden kann. Außerdem können durch die gesammelten Erfahrungen Optimierungsarbeiten für den Versuchsablauf durchgeführt werden

## 6 Literaturverzeichnis

1. *ISO 16842:2014 Metallic materials – Sheet and strip – Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece.* 2014.
2. *EN 1669 - Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfverfahren - Zipfelprüfung an Blechen und Bändern.* 1996.
3. *DIN EN ISO 20482 - Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Tiefungsversuch nach Erichsen .* 2013.
4. <http://www.ahoefer.de>. [Online] 5. Juni 2017. [Zitat vom: 5. Juni 2017.]  
[http://www.ahoefer.de/images/maschinenbau/werkstoffkunde/zerstoerende\\_werkstoffpruefung/tiefungsversuch.png](http://www.ahoefer.de/images/maschinenbau/werkstoffkunde/zerstoerende_werkstoffpruefung/tiefungsversuch.png).
5. *EN ISO 12004-2 Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve.* 2008, S. 7-13.
6. *Abaqus 6.14 Online Documentation Abschnitt 24.2.2 Damage initiation for ductile metals.* [Online] Abaqus, 15. Mai 2017. [Zitat vom: 15. Mai 2017.]  
<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/stm/default.htm>.
7. *DIN 50125 - Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben .* 2009. S. 15.
8. *DIN EN ISO 6892-1 - Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil1: Prüfung bei Raumtemperatur.* 2009. S. 19.

## 7 Anhang

### Anhang A - Python Zugversuch

```

from os import system

b = 20. # Breite in mm
d = 0.5 # Dicke in mm
E = 70000 # E-Modul in MPa
Datei_ein = open("Biax0_Alu_1_0.lia", "r")
Datei_aus = open("Biax0_Alu_1_0.dat", "w")

Zeilen = Datei_ein.readlines()
Variablen = Zeilen[0].split(";")
i_Zeile = Variablen.index("S/No")
i_Zeit = Variablen.index("C_1_Zeit[s]")
i_Kraft1 = Variablen.index("C_1_Kraft1[kN]")
#i_Kraft2 = Variablen.index("C_2_Kraft2[kN]")
i_Kraft3 = Variablen.index("C_3_Kraft3[kN]")
#i_Kraft4 = Variablen.index("C_4_Kraft4[kN]")
i_VEX1 = Variablen.index("C_1_VEX1[%]")
i_VEX2 = Variablen.index("C_1_VEX2[%]")
#i_VEX3 = Variablen.index("C_1_VEX3[%]")
#i_VEX4 = Variablen.index("C_1_VEX4[%]")

Datei_aus.write(" Zeile  Zeit [s]  "+\
               " eps1a [%]  eps1b [%]  eps2a [%]  eps2b [%]  "+\
               " sigma1 [MPa] sigma2 [MPa] sigma3 [MPa] sigma4 [MPa]"+\
               " epsplx [%]  epsply [%]  W0 [MPa]\n")
Wx,Wy,sigma1_alt,sigma2_alt,epsplx_alt,epsply_alt = 0,0,0,0,0,0
for Zeile in Zeilen[1:]:
    Liste = Zeile.split(";")
    i = int(Liste[i_Zeile])
    zeit = float(Liste[i_Zeit].replace(",","."))
    sigma1 = float(Liste[i_Kraft1].replace(",","."))*1000/(b*d) # Spannung
    #sigma2 = float(Liste[i_Kraft2].replace(",","."))*1000/(b*d) # Spannung
    sigma2 = 0
    sigma3 = float(Liste[i_Kraft3].replace(",","."))*1000/(b*d) # Spannung
    #sigma4 = float(Liste[i_Kraft4].replace(",","."))*1000/(b*d) # Spannung
    sigma4 = 0
    eps1a = (float(Liste[i_VEX1].replace(",",".")))/100
    eps1b = (float(Liste[i_VEX2].replace(",",".")))/100
    #eps2a = (float(Liste[i_VEX3].replace(",",".")))/100
    eps2a = 0
    #eps2b = (float(Liste[i_VEX4].replace(",",".")))/100
    eps2b = 0
    epsplx = eps1a-sigma1/E
    epsply = eps2a-sigma2/E
    dWx = (sigma1+sigma1_alt)/2 * (epsplx-epsplx_alt)

    Wx = Wx+dWx
    Wy = Wy+dWy
    W0 = Wx+Wy
    sigma1_alt = sigma1
    sigma2_alt = sigma2
    epsplx_alt = epsplx
    epsply_alt = epsply
    Datei_aus.write("%4i%i+%12.4f%zeit+\n"
                   "%13.6f"%(100*eps1a)+"%13.6f"%(100*eps1b)+"%13.6f"%(100*eps2a)+"%13.6f"%(100*eps2b)+\
                   "%13.6f"%sigma1+"%13.6f"%sigma2+"%13.6f"%sigma3+"%13.6f"%sigma4+\
                   "%13.6f"%(100*epsplx)+"%13.6f"%(100*epsply)+"%13.6f"%W0+"\n")

Datei_ein.close()
Datei_aus.close()

print("Umrechnung erfolgt!")
system("Biax0_Auswertung.plt")
print("Ende")

```



---

## Anhang B – Gnuplot Zugversuch

---

```
set key left bottom Left reverse #title "Equiv. pl. strain rates" # width -9.5

set grid
#set size 1.2,1.0
set origin 0.0,0.0

#####
set xlabel "Dehnung in %"
set ylabel "Spannung in MPa"
plot [:][0:300] \
    "Biax0_Alu_1_0.dat" using 3:7 t "Referenzversuch in WR" w l lt 1 lw 3

set term png enhanced font times 18 size 800, 800
    set output "Spannung_Dehnung.png"
    replot
set term windows
    pause -1 "Taste betaetigen"

exit gnuplot
```

---

## Anhang C – Python biachsialer Versuch

```

from os import system

b = 35.      # Breite in mm
d = 0.5      # Dicke in mm

for i_versuch in ["Einachsiger Versuch_Biax1_in_WR", \
                 "Einachsiger Versuch_Biax2_in_WR", \
                 "Einachsiger Versuch_Biax3_in_WR", \
                 "Einachsiger Versuch_Biax4_gegen_WR", \
                 "Einachsiger Versuch_Biax5_gegen_WR", \
                 "Einachsiger Versuch_Biax6_gegen_WR"]:
    Datei_ein = open(i_versuch+".lia","r")
    Datei_aus = open(i_versuch+".dat","w")

    Zeilen = Datei_ein.readlines()
    Variablen = Zeilen[0].split(";")
    i_Zeile = Variablen.index("S/No")
    i_Zeit = Variablen.index("C_1_Zeit[s]")
    i_Kraft1 = Variablen.index("C_1_Kraft1[kN]")
    i_Kraft3 = Variablen.index("C_3_Kraft3[kN]")
    i_VEX1 = Variablen.index("C_1_VEX1[%]")
    i_VEX2 = Variablen.index("C_1_VEX2[%]")

    Datei_aus.write(" Zeile   Zeit [s]   eps1a [%]   eps1b [%]   sigma1 [MPa] sigma3 [MPa] \n")

    for Zeile in Zeilen[1:]:
        Liste = Zeile.split(";")
        i = int(Liste[i_Zeile])
        zeit = float(Liste[i_Zeit].replace(",","."))
        sigma1 = float(Liste[i_Kraft1].replace(",","."))*1000/(b*d)
        sigma3 = float(Liste[i_Kraft3].replace(",","."))*1000/(b*d)
        eps1a = (float(Liste[i_VEX1].replace(",",".")))
        eps1b = (float(Liste[i_VEX2].replace(",",".")))

        Datei_aus.write("%6i"%i+"%12.4f"%zeit+"%12.6f"%eps1a+"%12.6f"%eps1b+"%12.6f"%sigma1+"%12.6f"%sigma3+"\n")

    Datei_ein.close()
    Datei_aus.close()

print("Umrechnung erfolgt!")
system("Einachsig_Auswertung_Biaxprobe_Alu.plt")
print("Ende")

```

## Anhang D – Gnuplot biachsialer Versuch

```
set key right bottom Left reverse #title "Equiv. pl. strain rates" # width -9.5

set grid
#set size 1.2,1.0
set origin 0.0,0.0

#####
set xlabel "Dehnung in %"
set ylabel "Spannung in MPa"
plot [0:][0:] \
    "Biach_Alu.dat" using 3:7 t "sigma 1" w l lt 1 lw 3,\
    "Biach_Alu.dat" using 5:8 t "sigma 2" w l lt 2 lw 3

set term png enhanced font times 18 size 800, 800
set output "Spannung_Dehnung.png"
replot
set term windows
pause -1 "Taste betaetigen"

exit gnuplot
```

## Anhang E – Python FLD

```

from os import system, rename

def interpol(x1,xm,x2,y1,y2):
    ym = y1 + (xm-x1)/(x2-x1) * (y2-y1)
    return ym

Datei_aus = open("Biax_Alu_FLDs.dat", "w")
Datei_aus.write("      epspl [%]      W0 [MPa] "+\
    " sigma1 [MPa] sigma2 [MPa] sigma3 [MPa] sigma4 [MPa] \n\n\n")

epspl_W0 = [[ 0.100000,    0.156276],\
[ 0.250000,    0.420363],\
[ 0.500000,    0.870490],\
[ 1.000000,    1.783121],\
[ 2.000000,    3.740861],\
[ 3.000000,    5.829845],\
[ 4.000000,    8.011830],\
[ 5.000000,   10.281992],\
[ 6.000000,   12.605511],\
[ 8.000000,   17.384053],\
[10.000000,   22.260387]]

for epspl,W0 akt in epspl_W0:
    sigma1_akt, sigma2_akt, sigma3_akt, sigma4_akt, W0_akt = 0., 0., 0., 0., 0.
    for i_versuch in ["../1_Alu_Zugversuch0_ISO6892_Ref/Biax0_Alu_1_0",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax1_Alu_1_1",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax2_Alu_2_1",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax3_Alu_4_3",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax4_Alu_1_1",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax5_Alu_3_4",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax6_Alu_1_2",\
        "../4_Alu_Biax_ISO_16842/Biax7_Alu_1_4",\
        "../5_Alu_Zuversuch8_ISO6892_gegenWR/Biax8_Alu_0_1"]:
        Datei_ein = open(i_versuch+".dat", "r")
        Zeilen = Datei_ein.readlines()

        n_flag = False
        for zeile in Zeilen[1:]:
            Variablen = zeile.strip().split()
            sigma1 = float(Variablen[6])
            sigma2 = float(Variablen[7])
            sigma3 = float(Variablen[8])
            sigma4 = float(Variablen[9])
            W0 = float(Variablen[12])
            if W0 >= W0_akt:
                sigma1_akt = interpol(W0_akt, W0, W0, sigma1_akt, sigma1)
                sigma2_akt = interpol(W0_akt, W0, W0, sigma2_akt, sigma2)
                sigma3_akt = interpol(W0_akt, W0, W0, sigma3_akt, sigma3)
                sigma4_akt = interpol(W0_akt, W0, W0, sigma4_akt, sigma4)
                Datei_aus.write("%13.6f"%epspl+"%13.6f"%W0_akt+\
                    "%13.6f"%sigma1_akt+"%13.6f"%sigma2_akt+\
                    "%13.6f"%sigma3_akt+"%13.6f"%sigma4_akt+"\n")
                n_flag = True
            sigma1_akt = sigma1
            sigma2_akt = sigma2
            sigma3_akt = sigma3
            sigma4_akt = sigma4
            W0_akt = W0
            if n_flag: break
        Datei_ein.close()
        Datei_aus.write("\n\n")
        print("Umrechnung für epspl="+str(epspl)+" erfolgt!")
Datei_aus.close()

print("Ende")

```

## Anhang F – Gnuplot FLD

```

set key left bottom Left reverse #title "Equiv. pl. strain rates" # width -9.5

set grid
#set size 1.2,1.0
set origin 0.0,0.0

#####
set xlabel "Spannung 1 in MPa"
set ylabel "Spannung 2 in MPa"
plot [::][:] \
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 1 u 3:4 t "epspl = 0.10%" w lp lt 1 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 2 u 3:4 t "epspl = 0.25%" w lp lt 2 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 3 u 3:4 t "epspl = 0.50%" w lp lt 3 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 4 u 3:4 t "epspl = 1.00%" w lp lt 4 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 5 u 3:4 t "epspl = 2.00%" w lp lt 5 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 6 u 3:4 t "epspl = 3.00%" w lp lt 6 lw 3,\
  "BiAx_AlU_FLDs.dat" i 7 u 3:4 t "epspl = 4.00%" w lp lt 7 lw 3,\
  #"BiAx_AlU_FLDs.dat" i 8 u 3:4 t "epspl = 5.00%" w lp lt 8 lw 3,\
  #"BiAx_AlU_FLDs.dat" i 9 u 3:4 t "epspl = 6.00%" w lp lt 9 lw 3,\
  #"BiAx_AlU_FLDs.dat" i 10 u 3:4 t "epspl = 8.00%" w lp lt 10 lw 3,\
  #"BiAx_AlU_FLDs.dat" i 11 u 3:4 t "epspl = 10.0%" w lp lt 11 lw 3

set term png enhanced font times 18 size 800, 800
set output "FLDs.png"
replot
set term windows
pause -1 "Taste betaetigen"

exit gnuplot

```